

Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα
8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

**Υδρολογικός σχεδιασμός έργων εκτροπής
και υπερχείλισης**

Ανδρέας Ευστρατιάδης & Παναγιώτης Παπανικολάου

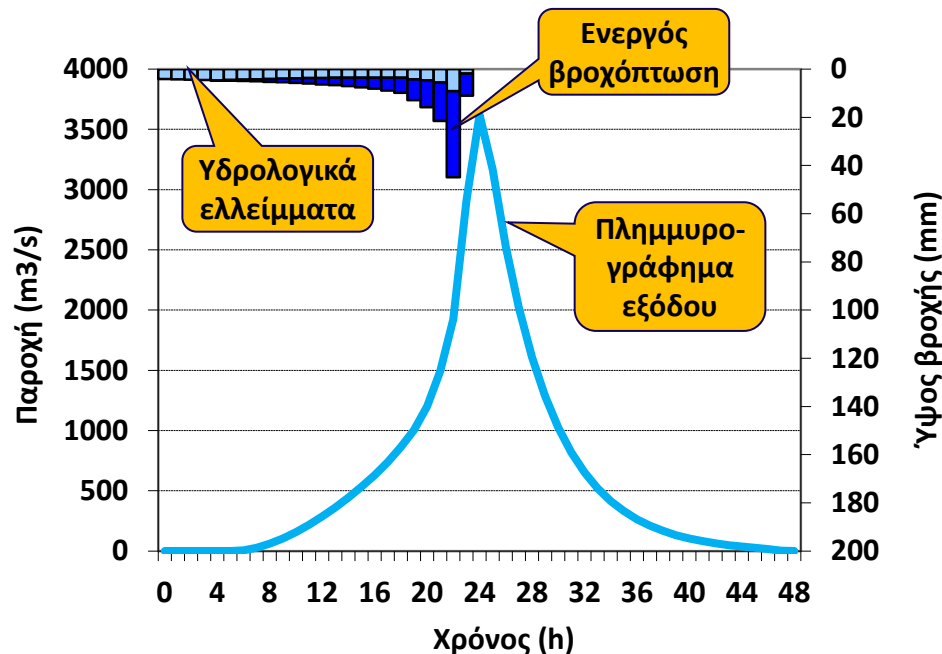
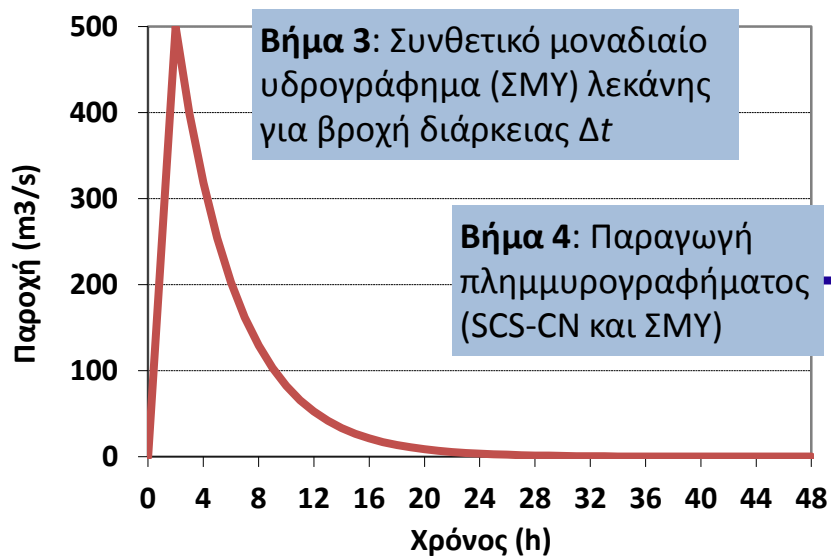
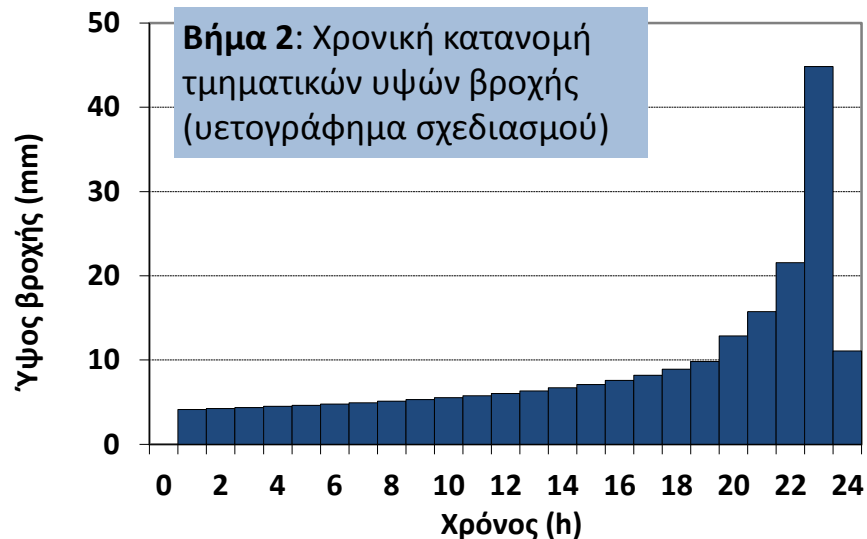
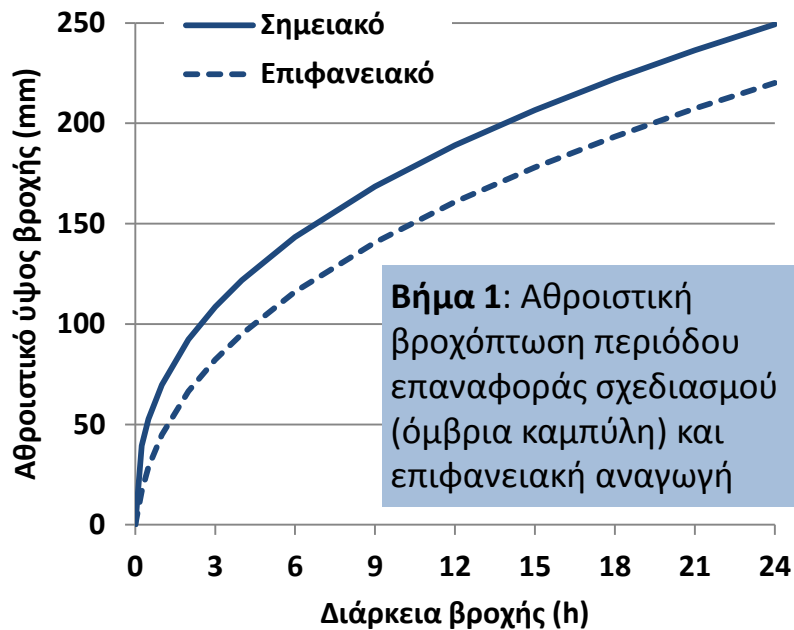
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2017-18

Μελέτες πλημμυρών φραγμάτων

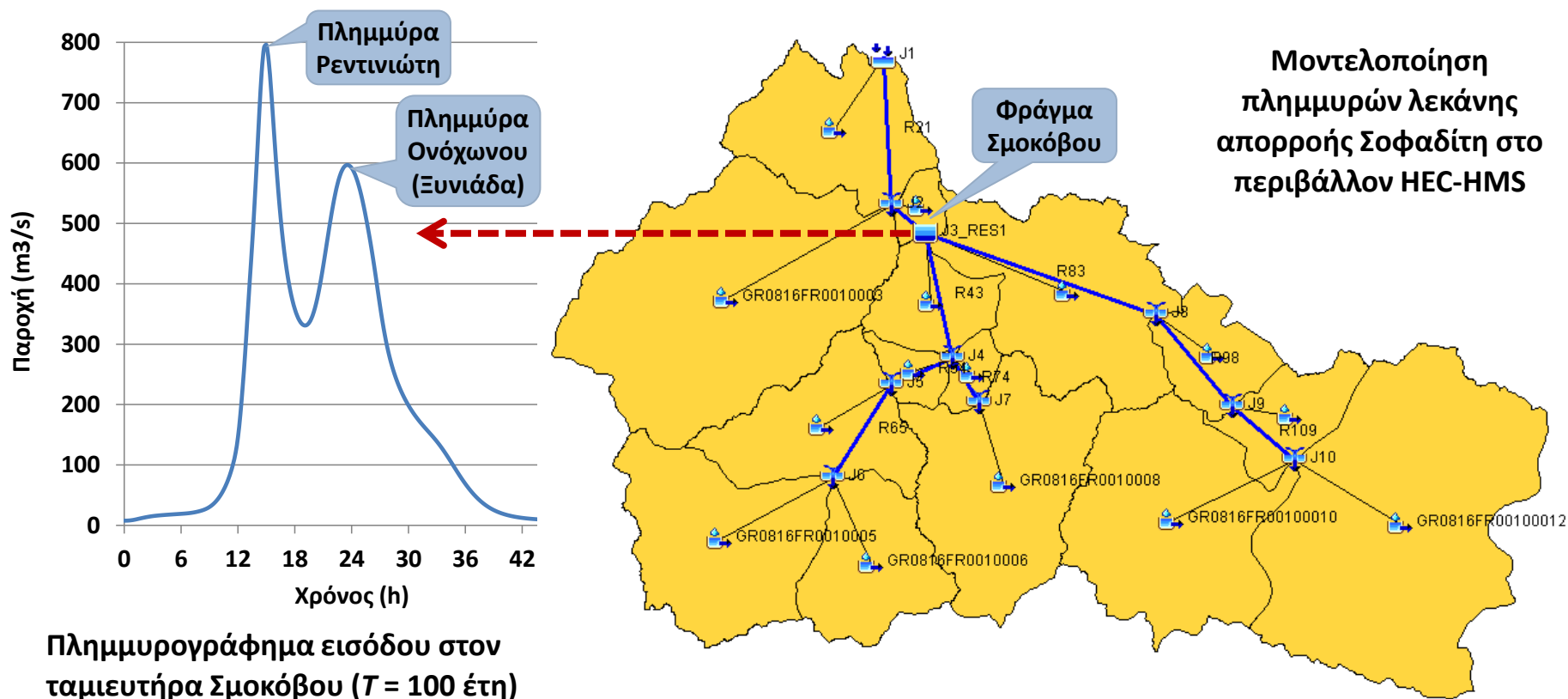
- ❑ Τα έργα ασφαλείας ενός φράγματος (έργα εκτροπής και υπερχειλιστής) υλοποιούν ανάσχεση των πλημμυρών, και ο υδραυλικός σχεδιασμός του γίνεται με βάση την **παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος εκροής**.
- ❑ Για την παραγωγή του υδρογραφήματος εκροής, απαιτείται αρχικά η παραγωγή του **υδρογραφήματος εισροής** από την ανάντη λεκάνη απορροής, που αποτελεί τυπικό πρόβλημα υδρολογίας πλημμυρών.
- ❑ Ο **υδρολογικός σχεδιασμός** γίνεται για πλημμύρες μεγάλης και πολύ μεγάλης περιόδου επαναφοράς (ενδεικτικά 20-50 έτη, για σήραγγες εκτροπής, και 1 000-10 000 ετη για υπερχειλιστές, αντίστοιχα), ο οποίος επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τις **δυνητικές επιπτώσεις** σε περίπτωση αστοχίας του έργου.
- ❑ Σε αντίθεση με τα κοινά αντιπλημμυρικά έργα (π.χ. δίκτυα ομβρίων, οχετοί), ζητείται η πλήρης χρονική εξέλιξη της πλημμύρας (**πλημμυρογράφημα**) και όχι μόνο η εκτίμηση της παροχής αιχμής.
- ❑ Τα βασικά ζητούμενα του σχεδιασμού είναι η **μέγιστη στάθμη ανάσχεσης ανάντη** και η **παροχή αιχμής κατάντη**.
- ❑ Ειδική περίπτωση μελέτης πλημμυρών είναι η **θραύση φράγματος**, στην οποία ζητείται η διάδοση του πλημμυρικού κύματος που αναμένεται να δημιουργηθεί στο κατάντη υδατόρευμα και την πλημμυροπεδιάδα, προκειμένου να αξιολογηθούν οι δυνητικές επιπτώσεις από την αστοχία του έργου (δισδιάστατη υδραυλική προσομοίωση).

Τυπική υπολογιστική διαδικασία (μοντέλα επεισοδίου)



Ημι-κατανεμημένα μοντέλα πλημμυρών

- Λόγω της ετερογένειας των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, θεωρείται ότι οι παράμετροι των μοντέλων και των ομβρίων καμπυλών διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη.
- Λόγω της σύνθετης γεωμετρίας του υδρογραφικού δικτύου, λαμβάνεται υπόψη ο χρονισμός των υδρογραφημάτων που παράγονται από κάθε υπολεκάνη (δεν αποκρίνονται όλα τα τμήματα της λεκάνης στον ίδιο χρόνο → ευνοϊκό ως προς τις πλημμυρικές αιχμές).
- Κατά περίπτωση, απαιτείται η περιγραφή φαινόμενων διάδρασης σε τμήματα του υδρογραφικού δικτύου (πεδινές περιοχές) με 1D ή 2D υδραυλικά μοντέλα.

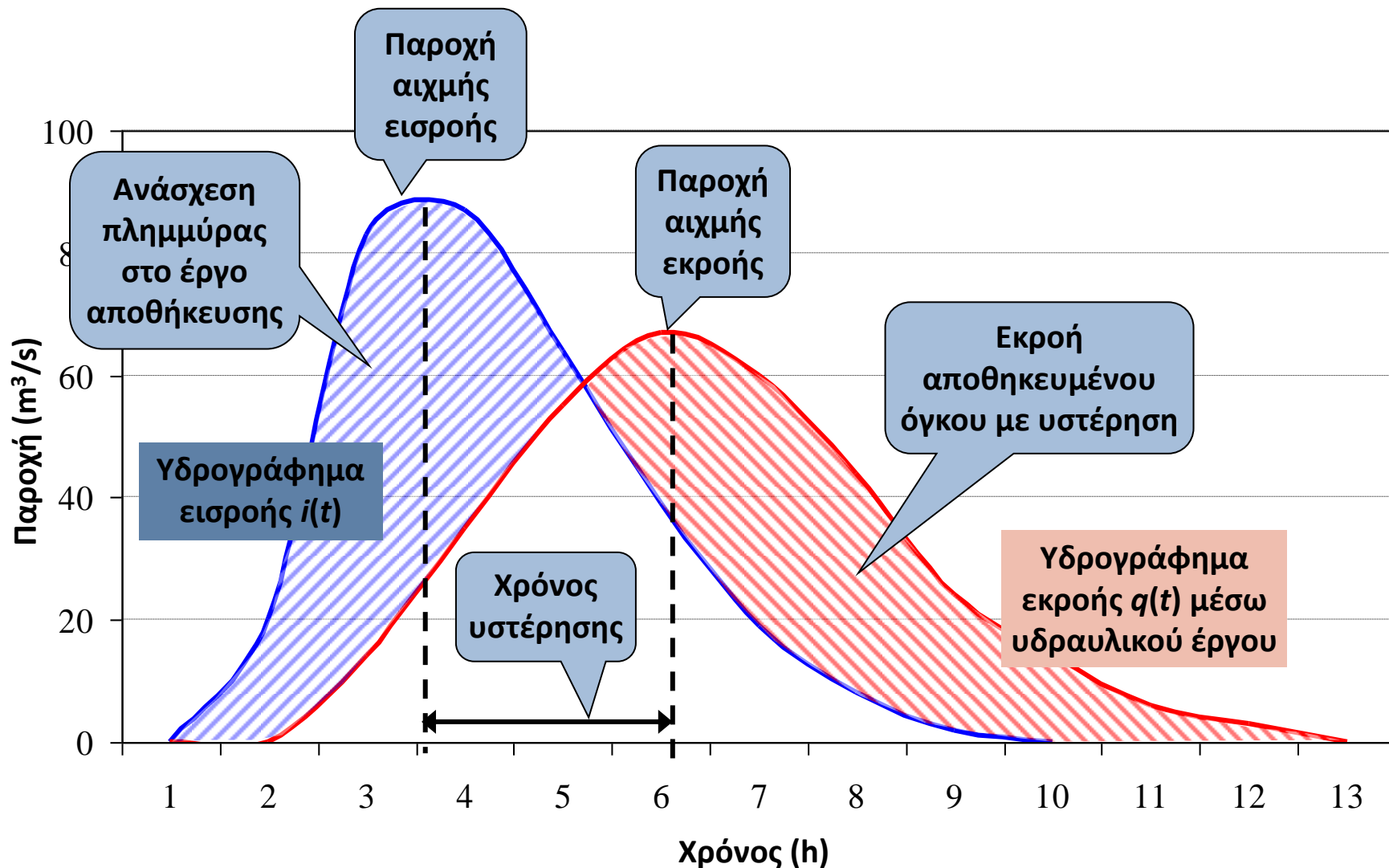


Υδρολογικός σχεδιασμός έργων ασφαλείας

- Υδρολογικός σχεδιασμός **σήραγγας εκτροπής**:
 - Σκοπός η προστασία του φράγματος κατά τη φάση κατασκευής του
 - Ανάσχεση πλημμύρας στη λεκάνη κατάκλυσης ανάντη του προφράγματος
 - Ροή στη σήραγγα αρχικά με ελεύθερη επιφάνεια και στη συνέχεια υπό πίεση
 - Ζητούμενα μεγέθη: διαστάσεις σήραγγας (συνήθως διάμετρος), ύψος προφράγματος → πρόβλημα οικονομοτεχνικής βελτιστοποίησης
 - Περίοδος επαναφοράς πλημμυρογραφήματος εισόδου 20-50 έτη

- Υδρολογικός σχεδιασμός **υπερχειλιστή**:
 - Σκοπός η προστασία του φράγματος κατά τη φάση λειτουργίας του και η ομαλή προσαγωγή των πλημμυρών στο κατάντη υδατόρευμα (σύστημα έργων υπερχειλίσης)
 - Ανάσχεση πλημμύρας στη λεκάνη κατάκλυσης (ταμιευτήρας) ανάντη του φράγματος
 - Ροή με ελεύθερη επιφάνεια πάνω από τον υπερχειλιστή (εξαιρέσεις: σήραγγοειδείς και χοανοειδείς υπερχειλιστές)
 - Ζητούμενα μεγέθη: διαστάσεις υπερχειλιστή (συνήθως ενεργό πλάτος), ανώτατη στάθμη πλημμύρας φράγματος → πρόβλημα οικονομοτεχνικής βελτιστοποίησης
 - Περίοδος επαναφοράς πλημμυρογραφήματος εισόδου 1 000-10 000 έτη (κατά περίπτωση, ο σχεδιασμός γίνεται με βάση την πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση, που εκτιμάται ότι αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς τάξης μεγέθους 60 000 έτη)

Διόδευση-ανάσχεση πλημμύρας μέσω συστήματος υδραυλικών έργων μεταφοράς και αποθήκευσης



Γενική υπολογιστική διαδικασία

□ Δεδομένα εισόδου:

- Πλημμυρογράφημα εισροής, i_t
- Σχέση **στάθμης-αποθέματος** έργου αποθήκευσης, $s = s(z)$
- Σχέση **στάθμης-παροχής** έργου μεταφοράς, $q = q(z)$

□ Ζητούμενα:

- Πλημμυρογράφημα εκροής από το έργο μεταφοράς, q_t
- Χρονική εξέλιξη στάθμης έργου αποθήκευσης, z_t

□ Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, σε συνεχή χρόνο (**εξίσωση συνέχειας**):

$$dS/dt = i(t) - q(t)$$

□ Η παραπάνω γράφεται ως **εξίσωση διαφορών** στο χρονικό διάστημα $\Delta t = t_j - t_{j-1}$, δηλαδή:

$$s(z_j) - s(z_{j-1}) = [i_{j-1} + i_j - q(z_j) - q(z_{j-1})] \Delta t/2$$

□ Σε κάθε χρονικό βήμα j , είναι γνωστά τα μεγέθη $s(z_{j-1})$, $q(z_{j-1})$, i_{j-1} και i_j , ενώ είναι άγνωστα τα μεγέθη s_j και q_j , που είναι **μη γραμμικές εξισώσεις της στάθμης z_j** . Η εξίσωση διαφορών μπορεί να λυθεί είτε βήμα προς βήμα είτε ως σύστημα εξισώσεων.

□ Εναλλακτικά, μπορεί να διατυπωθεί ως **πρόβλημα βελτιστοποίησης**, με ζητούμενο την ελαχιστοποίηση (μηδενισμός) του αθροιστικού σφάλματος ως προς τις άγνωστες στάθμες z_j :

$$\text{minimize } e(\mathbf{z}) = \sum [s(z_j) - s(z_{j-1}) - [i_{j-1} + i_j - q(z_j) - q(z_{j-1})] \Delta t/2]^2$$

□ Ο εφικτός χώρος περιορίζεται μεταξύ της στάθμης υδροληψίας z_{\min} και μιας ανώτατης επιτρεπόμενης στάθμης ανάσχεσης z_{\max} .

Διόδευση πλημμυρών από υπερχειλιστή

- Δεδομένα εισόδου:
 - Πλημμυρογράφημα λεκάνης ανάντη φράγματος, i_t (πλημμυρογράφημα εισροής)
 - Σχέση στάθμης-αποθέματος ταμιευτήρα, $s = s(z)$
 - Υψόμετρο στέψης υπερχειλιστή, z_c (ανώτατη στάθμη λειτουργίας ταμιευτήρα)
 - Σχέση στάθμης-παροχής υπερχειλιστή, $q = q(z)$
- Ζητούμενα:
 - Πλημμυρογράφημα εκροής από τον υπερχειλιστή, q_t
 - Διαστασιολόγηση υπερχειλιστή (εφόσον το πλημμυρογράφημα εισροής έχει εκτιμηθεί για την περίοδο επαναφοράς σχεδιασμού του υπερχειλιστή)
 - Σχεδιασμός κατάντη έργων (έργο προσαγωγής, έργο εκτόξευσης, λεκάνη ηρεμίας)
 - Χρονική εξέλιξη στάθμης ταμιευτήρα, z_t
 - Προσδιορισμός ύψους φράγματος (με βάση την ανώτατη στάθμη πλημμύρας)
 - Προσδιορισμός όγκου ανάσχεσης (αντιπλημμυρική προστασία κατάντη περιοχών)

Τυπική εξίσωση στάθμης-παροχής ελεύθερου υπερχειλιστή (τύπου ogee):

$$Q = C \sqrt{2g} L H^{3/2}$$

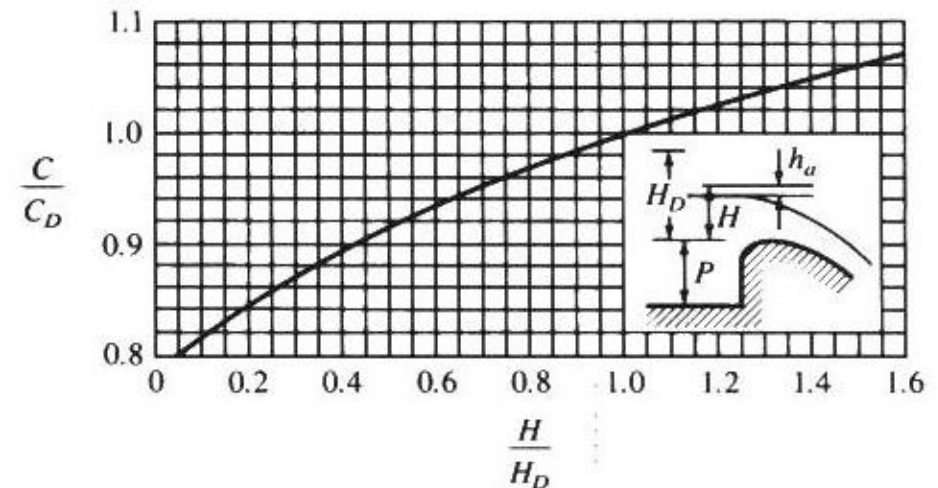
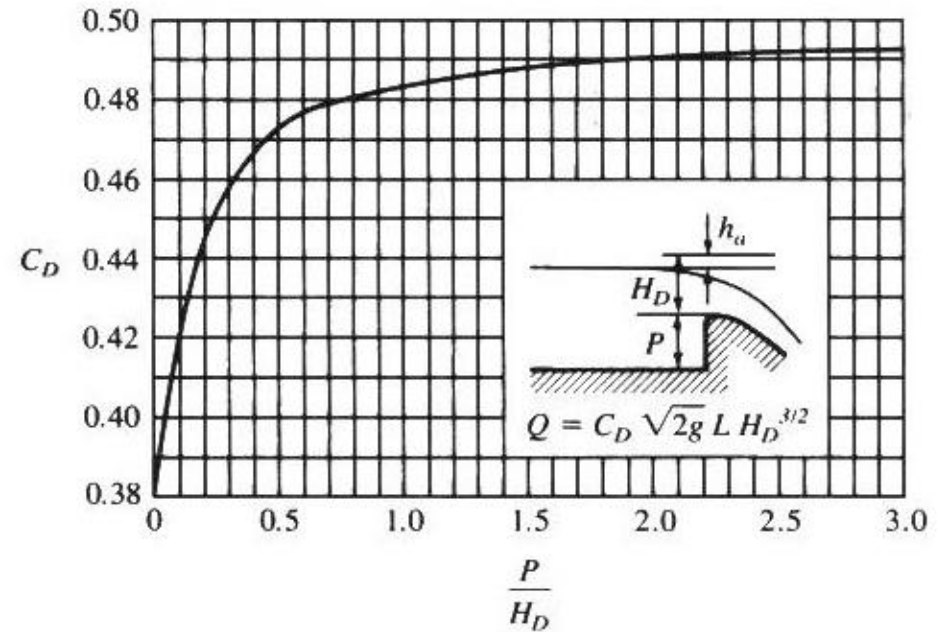
όπου C συντελεστής εξαρτώμενος από τα γεωμετρία του υπερχειλιστή και τα χαρακτηριστικά της ροής, L το ενεργό πλάτος του υπερχειλιστή, και H το υδραυλικό φορτίο, ήτοι το ύψος νερού πάνω από την στέψη του υπερχειλιστή ($H = z - z_c$).

Σχέση στάθμης-παροχής υπερχειλιστή τύπου ogee

- Ο συντελεστής C της σχέσης στάθμης-παροχής είναι συνάρτηση των λόγων P/H_D και H/H_D , όπου P το βάθος του νερού (βύθιση) ανάντη της στέψης του υπερχειλιστή και H_D το φορτίο σχεδιασμού (συνήθως λαμβάνεται ίσο με το 75-80% του μέγιστου φορτίου).
- Για μεγάλες τιμές του βάθους P ισχύει $C_D \approx 0.49$, οπότε ο συντελεστής C κυμαίνεται στο εύρος 0.39 ως 0.53, και συνεπώς ο όρος $C(2g)^{1/2}$ κυμαίνεται από 1.7 ως 2.3.
- Το ενεργό πλάτος υπερχειλιστή με μεσόβαθρα δίνεται από τη σχέση:

$$L = L' - 2(N K_p + K_a) H$$

όπου L' το καθαρό πλάτος, N το πλήθος των μεσοβάθρων, K_p συντελεστής συστολής, με τυπικές τιμές 0.01-0.02 για στρογγυλεμένες γωνίες, και K_a συντελεστής συστολής στο αντέρεισμα, με τιμές 0.20 για ορθογωνικό και 0.10 για κυκλικό σχήμα.



Πηγή: Roberson *et al.* (1998, σ. 361)

Πρακτικά θέματα σχεδιασμού υπερχειλιστών

□ Τυπικές παραδοχές:

- Στον προκαταρκτικό σχεδιασμό θεωρούμε μια τυπική τιμή του όρου C ($2g$)^{1/2}.
- Κατά την έναρξη της πλημμύρας ($j = 0$) ο ταμιευτήρας βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας του, δηλαδή $z_0 = z_c$ (συντηρητική παραδοχή)
- Τα έργα υδροληψίας με εκροή στην κοίτη του ποταμού (π.χ. στρόβιλοι) λειτουργούν με πλήρη παροχετευτικότητα, q_0 .
- Τα έργα υδροληψίας με εκροή εκτός της κοίτης (π.χ. υδρευτικές ή αρδευτικές υδροληψίας) λειτουργούν με τη συνήθη παροχή (κατά κανόνα, επειδή παροχή αυτή είναι πολύ μικρή συγκριτικά με τα πλημμυρικά μεγέθη, για απλούστευση αγνοείται).
- Εφόσον υπάρχουν θυροφράγματα, αυτά θεωρούνται ανοιχτά καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης του πλημμυρικού φαινομένου (εξαιρέση: ανατρεπόμενα θυροφράγματα).

□ Παρατηρήσεις:

- Εφόσον λειτουργούν τα έργα υδροληψίας με την πλήρη παροχετευτικότητά τους, από αυτά διέρχεται σταθερή παροχή q_0 , μέχρι η εισροή ανάντη να προκαλέσει ανύψωση της στάθμης πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή, οπότε για $z \leq z_c$ δεν πραγματοποιείται υπερχείλιση, ενώ για $z > z_c$ θεωρείται ότι διέρχεται παροχή q_0 από τις υδροληψίες και παροχή $q - q_0$ από τον υπερχειλιστή.
- Σε μελέτες επιχειρησιακής διαχείρισης πλημμυρών το πρόβλημα είναι πιο σύνθετο, καθώς λαμβάνεται υπόψη η ρύθμιση των εκροών από τις υδροληψίες ή και τα λοιπά έργα ελέγχου (π.χ. θυροφράγματα).

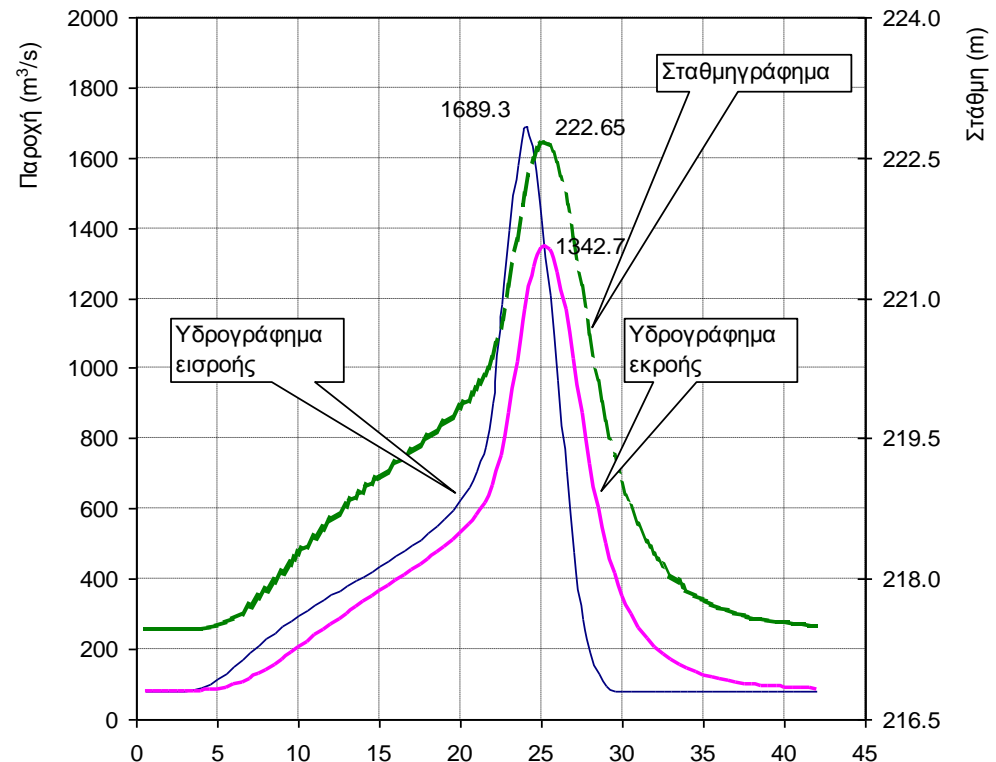
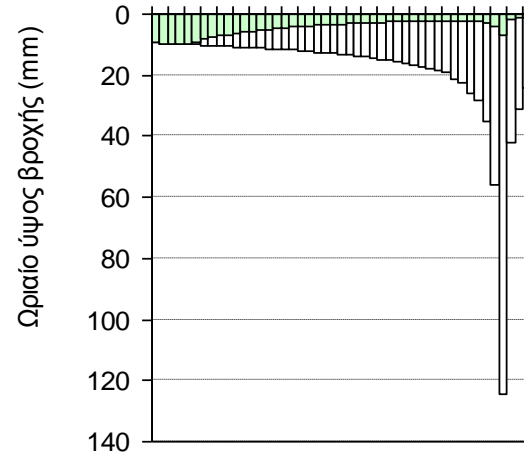
Παράδειγμα: Ταμιευτήρας Αποσελέμη

Παραδοχές μελέτης

- Περίοδος επαναφοράς 60 000 έτη (πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση)
- Βροχόπτωση διάρκειας 24 h
- Υετογράφημα δυσμενέστερης διάταξης
- Εκτίμηση ελλειμμάτων με τη μέθοδο SCS-CN, με CN = 55 και $\alpha = 20\%$
- ΣΜΥ Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας
- Βασική απορροή $81 \text{ m}^3/\text{s}$ (εισορή πηγών Κασταμονίτσας, εκτροπή από Οροπέδιο Λασιθίου, τήξη χιονιού)
- Υπερχειλιστής πλάτους $b = 40 \text{ m}$, $c = 2.2$

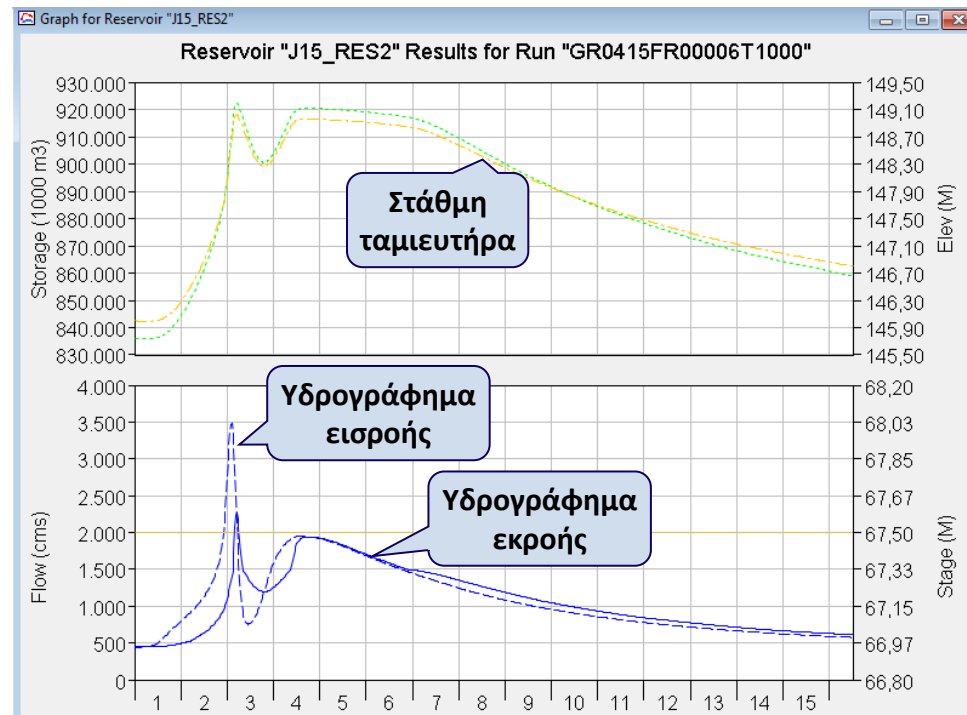
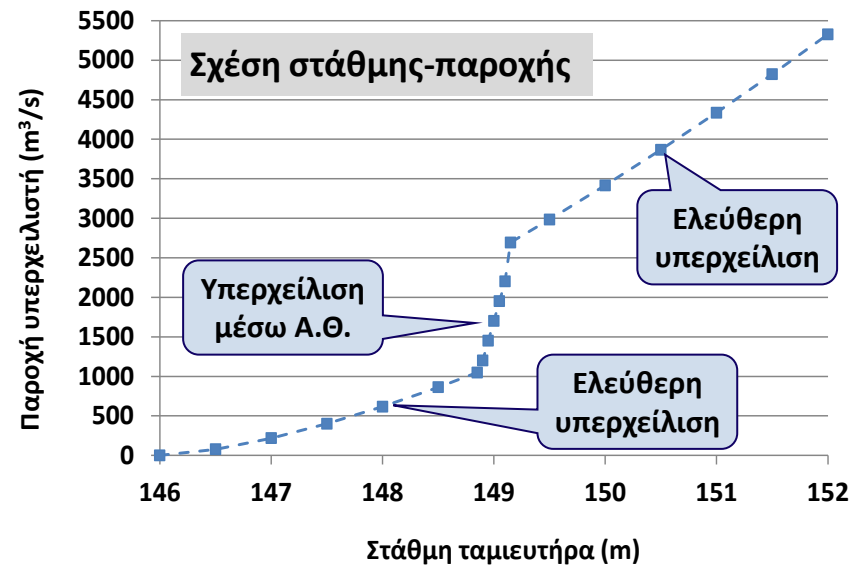
Βασικά μεγέθη σχεδιασμού

- Συνολικό ύψος βροχής 902 mm
- Ενεργό ύψος βροχής 693 mm
- Όγκος πλημμύρας 42.0 hm^3
- Συνολικός όγκος εισροής 50.5 hm^3
- Παροχή αιχμής εισόδου $1689 \text{ m}^3/\text{s}$
- Παροχή αιχμής εξόδου $1342 \text{ m}^3/\text{s}$
- Μέγιστη στάθμη πλημμύρας $+222.65 \text{ m}$
- Στέψη υπερχειλιστή $+216.50 \text{ m}$



Παράδειγμα: Ταμιευτήρας Καστρακίου (ανατρεπόμενα θυροφράγματα)

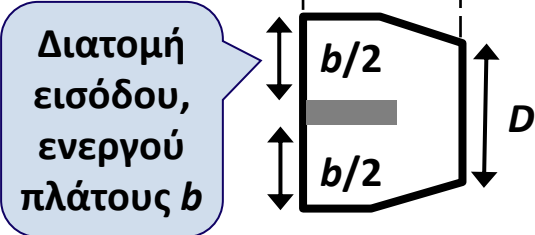
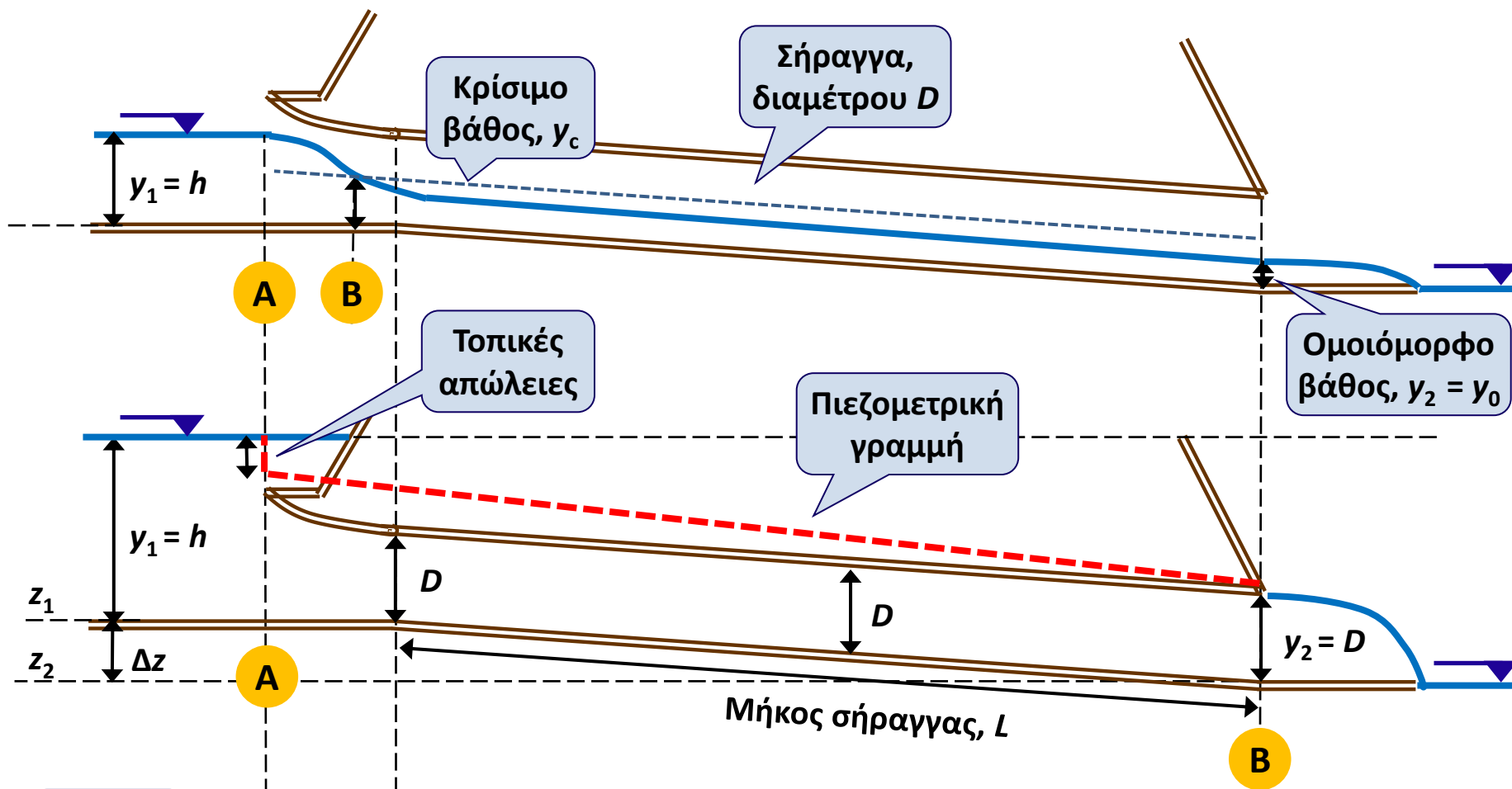
- Στέψη υπερχειλιστή +144.6 m, πλάτος 120 m, ύψη ανατρεπόμενων θυροφραγμάτων από 1.80 έως 1.93 m.
- Μεταξύ των +146.0 έως +148.85 m πραγματοποιείται **ελεύθερη υπερχειλίση**, με σχέση στάθμης-παροχής είναι $q = c b (z - z_0)^{3/2}$, όπου $c = 1.816$ και $z_0 = +146.0$ m.
- Από τα +148.85 έως τα +149.15 m πραγματοποιείται **διαδοχική ανατροπή των 20 θυροφραγμάτων** για κάθε 5 cm αύξησης της στάθμης.
- Άνω των +149.15 m τα θυροφράγματα έχουν ανατραπεί, η **υπερχειλίση είναι ελεύθερη** (από την αρχική, πλέον, στέψη του υπερχειλιστή), και η σχέση στάθμης-παροχής γίνεται $q = c b (z - z_0)^{3/2}$, όπου $c = 2.038$ και $z_0 = +144.2$ m.



Πηγή: Καραβοκύρης & Συν/τες, 2015

Προσομοίωση για $T = 1000$ έτη

Υδραυλικοί υπολογισμοί σήραγγας εκτροπής



Τύποι ροής στη σήραγγα εκτροπής:

- $h \leq 1.2 D$: Ροή με ελεύθερη επιφάνεια (h : υδραυλικό φορτίο)
- $1.2 D < h < 1.5 D$: Μεταβατική ροή (ασταθής)
- $h \geq 1.5 D$: Ροή υπό πίεση

Ροή με ελεύθερη επιφάνεια ($h \leq 1.2D$)

Δεδομένα και υποθέσεις

- Οριζόντιος πυθμένας και μηδενική ταχύτητα ανάντη (ταμιευτήρας)
- Ορθογωνική διατομή εισόδου, ενεργού πλάτους b ,
- Συντελεστής τοπικών απωλειών k (για ομαλή συναρμογή $k \approx 0.1$)
- **Ροή υπερκρίσιμη** → η ελεύθερη επιφάνεια τέμνει τη γραμμή κρίσιμου βάθους κοντά στην είσοδο της διατομής συναρμογής (έλεγχος: ομοιόμορφο βάθος < κρίσιμο βάθος)

Βασικές σχέσεις υπολογισμού

- Εξίσωση ενέργειας μεταξύ ανάντη διατομής και διατομής κρίσιμου βάθους:

$$h = y_c + \frac{V_c^2}{2g} + k \frac{V_c^2}{2g} = y_c + (1 + k) \frac{V_c^2}{2g} \quad (1)$$

- Επειδή στη θέση του κρίσιμου βάθους η διατομή είναι ορθογωνική ισχύει:

$$Fr = 1 \rightarrow \frac{V_c}{\sqrt{g y_c}} = 1 \rightarrow \frac{V_c^2}{g} = y_c \quad (2)$$

- Αντικαθιστώντας την (2) στην (1) προκύπτει:

$$h = y_c + (1 + k) \frac{y_c}{2} = (3 + k) \frac{y_c}{2} \rightarrow y_c = \frac{2h}{3 + k} \quad (3)$$

- Συνδυάζοντας τις (2) και (3) προκύπτει η **σχέση στάθμης-παροχής**:

$$y_c = \frac{Q^2}{b^2 y_c^2 g} \rightarrow Q = b \sqrt{g y_c^3} \rightarrow Q = b \sqrt{\frac{8g h^3}{(3 + k)^3}} \rightarrow Q = \lambda h^{3/2} \quad (4)$$

Ροή υπό πίεση ($h \geq 1.5D$)

- Εξίσωση ενέργειας μεταξύ διατομών εισόδου και εξόδου:

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

- Θέτοντας $y_1 = h$ (υδραυλικό φορτίο ανάντη), $y_2 = D$ (βάθος ροής κατάντη = διάμετρος σήραγγας), $V_1 \approx 0$ (μηδενική ροή ανάντη) και $V_2 = 4Q/\pi D^2$ προκύπτει:

$$\Delta h = \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} + h_f \quad (2)$$

όπου $\Delta h = h + \Delta z - D$ (Δz : υψομετρική διαφορά πυθμένων διατομών εισόδου και εξόδου).

- Οι απώλειες ενέργειας, h_f , περιλαμβάνουν τις **τοπικές απώλειες** στην διατομή εισόδου, εμβαδού $A_{\text{εισ}}$, και τις **γραμμικές απώλειες**, κατά μήκος της σήραγγας εκτροπής. Οι πρώτες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$h_T = k \frac{V_{\text{εισ}}^2}{2g} = k \frac{Q^2}{2g A_{\text{εισ}}^2} \quad (3)$$

- Οι γραμμικές απώλειες ενέργειας εκτιμώνται από τη **σχέση του Manning**:

$$h_L = J L = \frac{4^{10/3} n_0^2 Q^2}{\pi^2 D^{16/3}} L \quad (4)$$

- Συνδυάζοντας τις (2), (3) και (4) προκύπτει η **σχέση στάθμης-παροχής**:

$$\Delta h = \left(\frac{8}{\pi^2 g D^4} + \frac{k}{2g A_{\text{εισ}}^2} + \frac{4^{10/3} n_0^2 L}{\pi^2 D^{16/3}} \right) Q^2 \rightarrow Q = \mu (h + \Delta z - D)^{1/2} \quad (5)$$

Ροή υπό πίεση – Παρατηρήσεις

- ❑ Ο **συντελεστής τοπικών απωλειών** στη διατομή εισόδου, για ομαλή προσαγωγή της ροής, λαμβάνεται ίσος με $k = 0.10$ ως 0.20 .
- ❑ Οι **γραμμικές απώλειες** εκτιμώνται από τη σχέση ομοιόμορφης ροής του Manning, όπου το μέγεθος J αναφέρεται στην κλίση της πιεζομετρικής γραμμής (όχι του πυθμένα). Η χρήση της εν λόγω σχέσης γίνεται λόγω των σχετικά μεγάλων συντελεστών τραχύτητας, επιτρέποντας την κατάρτιση αναλυτικών σχέσεων στάθμης-παροχής.
- ❑ **Συντελεστής τραχύτητας**, n_0 , για ολική πλήρωση της σήραγγας:
 - Επένδυση με σκυρόδεμα $n_0 = 0.014$
 - Επένδυση με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα $n_0 = 0.022$
 - Χωρίς επένδυση (φυσικός βράχος) $n_0 = 0.030$
- ❑ Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να εφαρμοστεί η **γενικευμένη εξίσωση Manning**:

$$J = \left(\frac{4^{3+\beta} N^2 Q^2}{\pi^2 D^{5+\beta}} \right)^{1/(1+\gamma)}$$

με χρήση των ακόλουθων συντελεστών, που ισχύουν για μεγάλες διαμέτρους και ταχύτητες:

$$\beta = 0.25 + 0.0006 \varepsilon_* + \frac{0.024}{1 + 7.2 \varepsilon_*} \quad \gamma = \frac{0.083}{1 + 0.42 \varepsilon_*} \quad N = 0.00757 (1 + 2.47 \varepsilon_*)^{0.14}$$

όπου $\varepsilon_* := \varepsilon/\varepsilon_0$ η αδιαστατοποιημένη τραχύτητα (ε σε m), με $\varepsilon_0 = (v^2/g)^{1/3} = 0.00005$ m.

- ❑ Ο **συντελεστής τραχύτητας κατά Manning**, n_0 , και η **ισοδύναμη τραχύτητα**, ε , συνδέονται μέσω της προσεγγιστικής σχέσης: $n_0 \approx \varepsilon^{1/6}/26$ (π.χ. για $n_0 = 0.014$, $\varepsilon = 2.5$ mm).

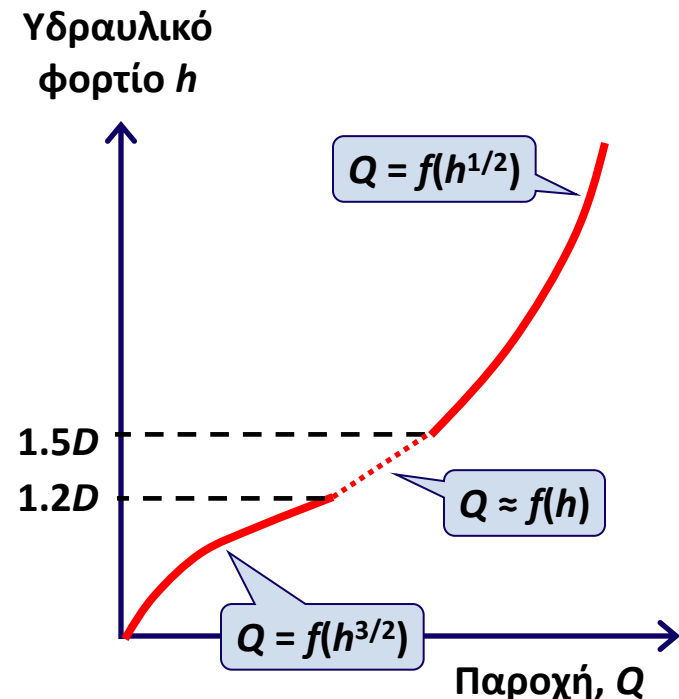
Διόδευση πλημμύρας από σήραγγα εκτροπής

□ Δεδομένα εισόδου:

- Πλημμυρογράφημα εισροής, I_t
- Σχέση στάθμης-αποθέματος λεκάνης κατάκλυσης, $S = S(z)$
- Χαρακτηριστικά μεγέθη διατομής εισόδου (ενεργό πλάτος b , εμβαδόν καθαρής διατομής $A_{\text{εισ}}$, συντελεστής τοπικών απωλειών, k)
- Χαρακτηριστικά μεγέθη σήραγγας (μήκος L , διάμετρος D , συντελεστής τραχύτητας n_0)
- Υψομετρική διαφορά, Δz , μεταξύ των πυθμένων των διατομών εισόδου και εξόδου

□ Υπολογιστική διαδικασία:

- Κατάρτιση σχέσης στάθμης-παροχής σήραγγας εκτροπής, $Q = Q(h)$
- Στην ενδιάμεση περιοχή $1.2D < h < 1.5D$, η ροή είναι ασταθής, και η σχέση στάθμης-παροχής θεωρείται κατά προσέγγιση γραμμική.
- Επίλυση μοντέλου διόδευσης, με επιλογή, σε κάθε χρονικό βήμα, της κατάλληλης σχέσης $Q(h)$, ανάλογα με το τρέχον υδραυλικό φορτίο, h .
- Από την επίλυση προκύπτει μια μέγιστη τιμή του υδραυλικού φορτίου, από το οποίο καθορίζεται το ύψος του προφράγματος (αφού προστεθεί και ένα ελεύθερο περιθώριο μέχρι τη στέψη).



Ειδικά θέματα: Υπολογισμοί ομοιόμορφης ροής σε αγωγούς κυκλικής διατομής

Βασικές σχέσεις υπολογισμού για μεταβλητό συντελεστή τραχύτητας:

$$V = \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{2/3} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$$

$$V_0 = \frac{1}{n_0} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2}$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{n_0}{n} \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{2/3}$$

$$Q = \frac{1}{2 \times 4^{5/3}} \frac{1}{n} \vartheta \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{5/3} D^{8/3} J^{1/2}$$

$$Q_0 = \frac{\pi}{4^{5/3}} \frac{1}{n_0} D^{8/3} J^{1/2}$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n_0}{n} \frac{\vartheta}{2\pi} \left(1 - \frac{\sin \vartheta}{\vartheta}\right)^{5/3}$$

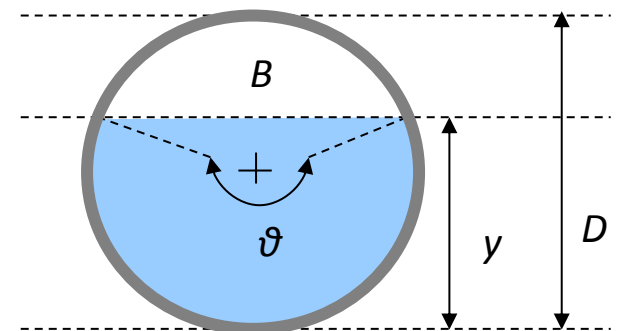
$$n/n_0 = 1 + 0.62(y/D)^{0.4} (1 - y/D)^{0.9}$$

$$n/n_0 = 1 + 2.31(\vartheta/2\pi)^{1.2} (1 - \vartheta/2\pi)^2$$

Σχέσεις γεωμετρικών χαρακτηριστικών ροής σε αγωγό κυκλικής διατομής με μερική και ολική πλήρωση

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Μερική πλήρωση ($y < D$)	Ολική πλήρωση ($y = y_0 = D$)
Λόγος πλήρωσης, y/D	$\frac{y}{D} = \frac{1 - \cos(\vartheta/2)}{2}$	$\frac{y_0}{D} = 1$
Γωνία, ϑ	$\vartheta = 2 \arccos(1 - 2y/D)$	$\vartheta_0 = 2\pi$
Εμβαδό υγρής διατομής, A	$A = (\vartheta - \sin \vartheta) D^2 / 8$	$A_0 = \pi D^2 / 4$
Βρεχόμενη περίμετρος, P	$P = \vartheta D / 2$	$P_0 = \pi D$
Υδραυλική ακτίνα, R	$R = (1 - \sin \vartheta / \vartheta) D / 4$	$R_0 = D / 4$
Πλάτος στην ελεύθερη επιφάνεια, B	$B = D \sin(\vartheta/2) = 2\sqrt{y(D-y)}$	0
Λόγος A/A_0	$A/A_0 = (\vartheta - \sin \vartheta) / 2\pi$	1
Λόγος R/R_0	$R/R_0 = 1 - \sin \vartheta / \vartheta$	1

Εναλλακτικές (όχι ισοδύναμες) σχέσεις μεταβολής συντελεστή τραχύτητας συναρτήσει του βάθους ροής y



Πηγή: Κουτσογιάννης, 1999, σ. 63-69

Ειδικά θέματα: Υπολογισμός ομοιόμορφου βάθους ροής σε κυκλικό αγωγό για δεδομένη παροχή

1. Για διάμετρο D , κλίση πυθμένα J , και συντελεστή τραχύτητας n_0 , υπολογίζεται η παροχή πλήρωσης:

$$Q_0 = \frac{\pi}{4^{5/3}} \frac{1}{n_0} D^{8/3} J^{1/2}$$

2. Για παροχή Q , υπολογίζεται ο λόγος Q/Q_0 .
3. Η γωνία ϑ υπολογίζεται από την γενική επαναληπτική σχέση:

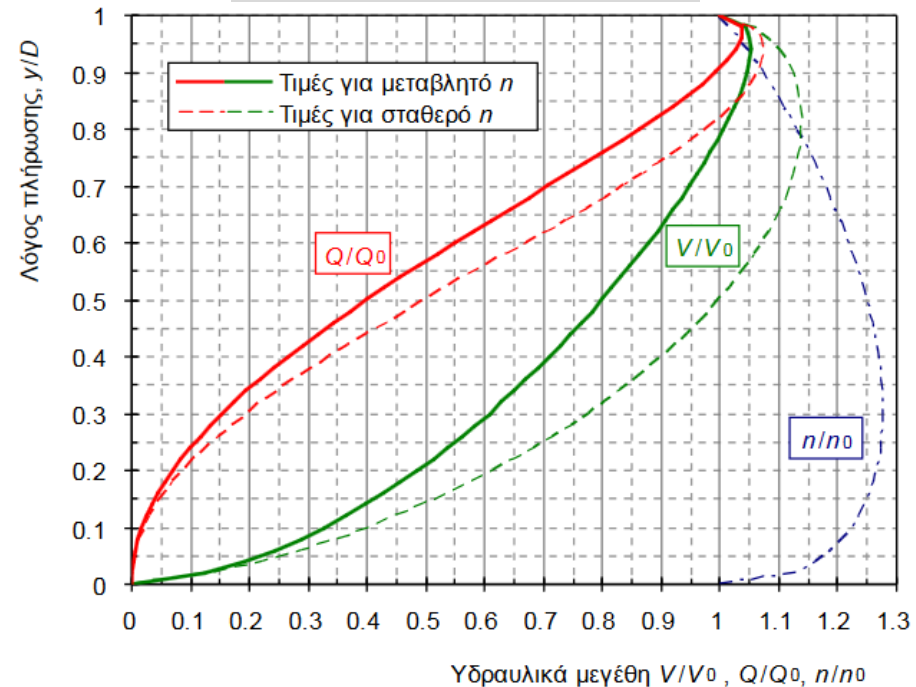
$$\vartheta = \left[\vartheta + \sin \vartheta + \left(2\pi \frac{Q}{Q_0} \frac{n}{n_0} \right)^{0.6} \vartheta^{0.4} \right] / 2$$

όπου ως αρχική τιμή θέτουμε $\vartheta_0 = \pi$ (που αντιστοιχεί σε ποσοστό πλήρωσης $y/D = 0.50$), και οι επαναλήψεις συνεχίζουν μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

4. Σε κάθε επαναληπτικό βήμα, ο λόγος n/n_0 υπολογίζεται από την σχέση:

$$n/n_0 = 1 + 2.31(\vartheta/2\pi)^{1.2}(1 - \vartheta/2\pi)^2$$

Πηγή: Κουτσογιάννης, 1999, σ. 66



5. Για γωνία πλήρωσης ϑ , το βάθος ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$y = D \frac{1 - \cos(\vartheta/2)}{2}$$

6. Ελέγχεται αν $y < y_c$ (στις σήραγγες εκτροπής επιθυμητή η υπερκρίσιμη ροή)

Ειδικά θέματα: Ελάχιστη κλίση για την εξασφάλιση συνθηκών υπερκρίσιμης ροής στη σήραγγα εκτροπής

Για $h = 1.2D$ (μέγιστο υδραυλικό φορτίο για ροή με ελεύθερη επιφάνεια) και $k = 0.10$ (συντελεστής τοπικών απωλειών για ομαλή συναρμογή εισόδου), το κρίσιμο βάθος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$y_c = \frac{2h}{3+k} = \frac{2.4 D}{3+k} = 0.78 D \quad (1)$$

Η παροχή που αντιστοιχεί στο παραπάνω υδραυλικό φορτίο είναι:

$$Q = b \sqrt{g y_c^3} \rightarrow Q = 2.13 b D^{3/2} \quad (2)$$

όπου b το ενεργό πλάτος της διατομής εισόδου.

Η ροή είναι υπερκρίσιμη εφόσον $y < y_c$, που αντιστοιχεί σε ποσοστό πλήρωσης $y/D < 0.78$, ή, ισοδύναμα, $Q/Q_0 < 0.82$. Σε συνδυασμό με τη (2) προκύπτει ότι η ελάχιστη απαιτούμενη παροχή πλήρωσης είναι:

$$Q_{0,\min} = 2.60 b D^{3/2} \quad (3)$$

Επιλύοντας τη σχέση του Manning ως προς την κλίση J , προκύπτει ότι η ελάχιστη απαιτούμενη κλίση της σήραγγας εκτροπής είναι:

$$J_{\min} = \frac{4^{10/3} n_0^2}{\pi^2 D^{16/3}} Q_{0,\min}^2 \quad (4)$$

όπου n_0 ο συντελεστής τραχύτητας της σήραγγας.

Ειδικά θέματα: Τοπικές απώλειες

- Για συνήθεις ταχύτητες, ο συντελεστής απωλειών για **απότομη συστολή ροής**, με μετάβαση από αγωγό διαμέτρου D_1 σε διάμετρο $D_2 < D_1$, εκτιμάται σε:

$$k \approx 0.42 [1 - (D_2/D_1)^2]$$

- Περίπτωση **υδροληψίας** (μετάβαση από ταμιευτήρα ή δεξαμενή άπειρης διατομής σε αγωγό διαμέτρου D):

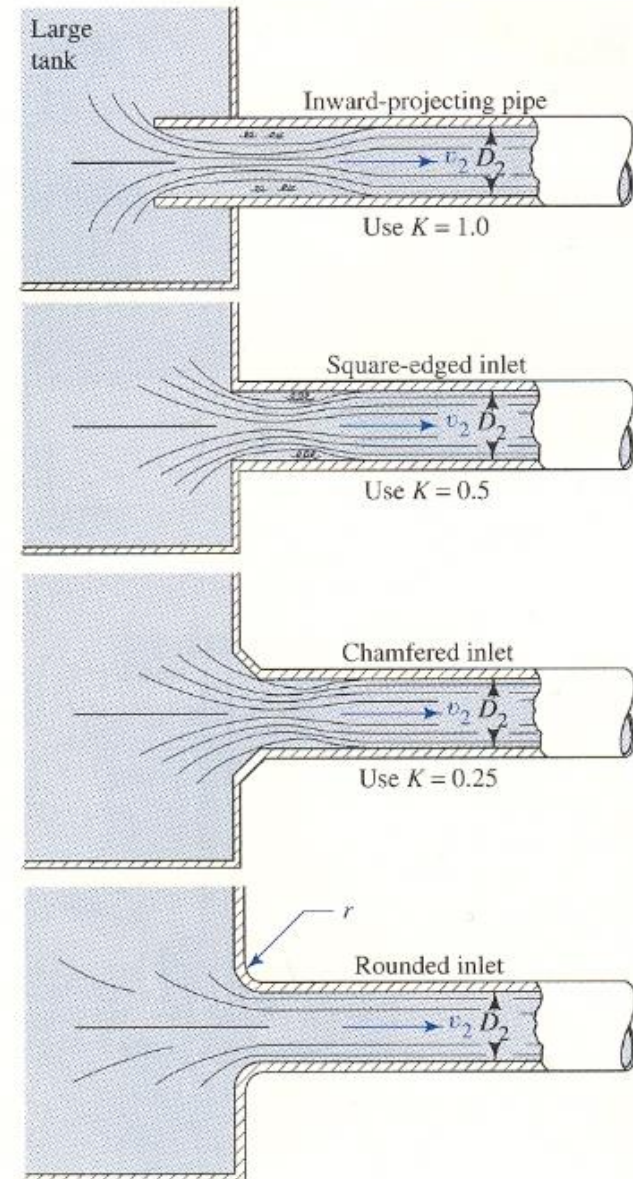
- Αγωγός που εισέρχεται στη δεξαμενή: $k = 1$
- Αγωγός που εφάπτεται στη δεξαμενή: $k = 0.50$
- Συστολή με απλό κώνο συναρμογής: $k = 0.25$
- Βαθμιαία συστολή μέσω κώνου συναρμογής γωνίας ϑ :
 $k = 0.02-0.04$ (ισχύει για $\vartheta = 30-45^\circ$)
- Βαθμιαία συστολή μέσω κώνου συναρμογής ακτίνας r :

r/D	0.00	0.02	0.04	0.06	0.10	>0.15
k_T	0.50	0.28	0.24	0.15	0.09	0.04

- Για συνήθεις ταχύτητες, ο συντελεστής απωλειών για **απότομη διαστολή ροής**, με μετάβαση από αγωγό διαμέτρου D_1 σε διάμετρο $D_2 > D_1$, εκτιμάται σε:

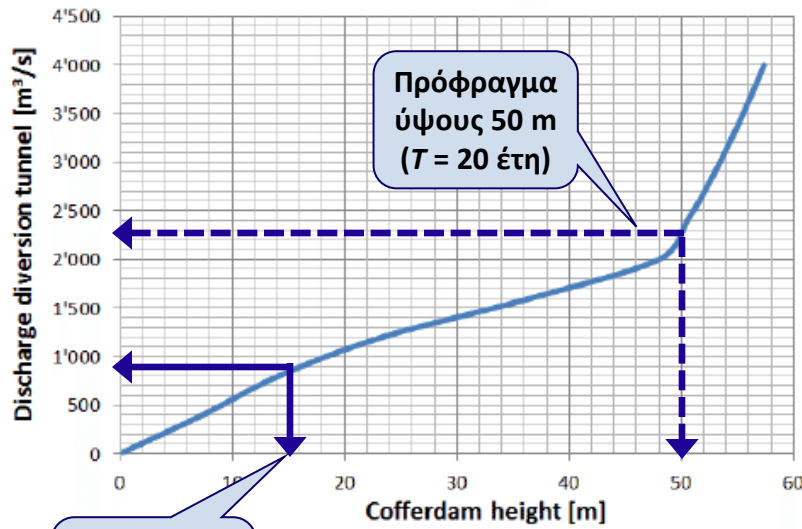
$$k = [1 - (D_1/D_2)^2]^2$$

- Σε απότομη διαστολή ($D_1/D_2 \rightarrow 0$) λαμβάνεται $k = 1$ (**εκροή σε δεξαμενή**).



Παράδειγμα: Ταμιευτήρας Cerro del Aguila (Περου)

- Υ/Η φράγμα βαρύτητας, μήκους 270 m και ύψους 80 m.
- Παροχετευτικότητα υπερχειλιστή 7000 m³/s.
- Στον πυθμένα κατασκευάστηκαν έξι θύρες εκκένωσης, διαστάσεων 4.5 × 6.0 m, παροχετευτικότητας 4560 m³/s, με σκοπό την έκπλυση των φερτών (μέση ετήσια στερεοαπορροή 3.5 Mm³, νεκρός όγκος μόλις 0.6 Mm³).
- Κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου, λειτούργησαν ως πρόσθετα έργα εκτροπής, δεδομένου ότι η σήραγγα εκτροπής και το πρόφραγμα σχεδιάστηκαν για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς μικρότερης του έτους.



Πηγή: http://www.researchgate.net/publication/284284812_Design_and_erection_of_the_6_bottom_outlets_of_Cerro_del_Aguila_dam_for_flood_routing_during_construction_and_future_sediment_flushing

Αναφορές

- Καραβοκύρης & Συν/τες, *Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, Ηπείρου και Θεσσαλίας (GR04, GR05, GR08)*, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, ΥΠΕΚΑ, 2015.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Ναλμπάντης, Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης, Λ. Λαζαρίδης, και Α. Δανιήλ, Υδρολογική μελέτη πλημμυρών, *Τεχνικός Σύμβουλος για το έργο "Υδρευση Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη"*, Εργοδότης: ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάδοχος: Κ/Ξ Αποσελέμη, Αθήνα, 2001.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, 180 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
- Παπανικολάου, Π. *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 2, 264 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012.
- Roberson, J. A., J. J. Cassidy, and M. H. Chaudhry , *Hydraulic Engineering*, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York., 1998